

BUNDE~~R~~REPUBLIK DEUTS~~S~~LAND



REC'D 19 DEC 2003
WIPO PCT

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 53 739.9
Anmeldetag: 19. November 2002
Anmelder/Inhaber: MTU Friedrichshafen GmbH, Friedrichshafen/DE
Bezeichnung: Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
IPC: F 02 D 41/14

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 20. Oktober 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Wehner

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

MTU Friedrichshafen GmbH

15.11.2002

Zusammenfassung

5 Zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine (2) sieht die Erfindung vor, dass bei dynamischen Zustandsänderungen mittels eines zweiten Filters (13) eine zweite Regelabweichung (dR_2) berechnet wird. Bei dynamischen Zustandsänderungen bestimmt sodann ein Drehzahl-Regler (11) ein leistungsbestimmendes Signal (v_e) in Abhängigkeit einer ersten Regelabweichung (dR_1) und der zweiten Regelabweichung (dR_2). Durch die Erfindung wird die Dynamik des Regelkreises erhöht.

10

(Fig. 2)

15

20

25

30

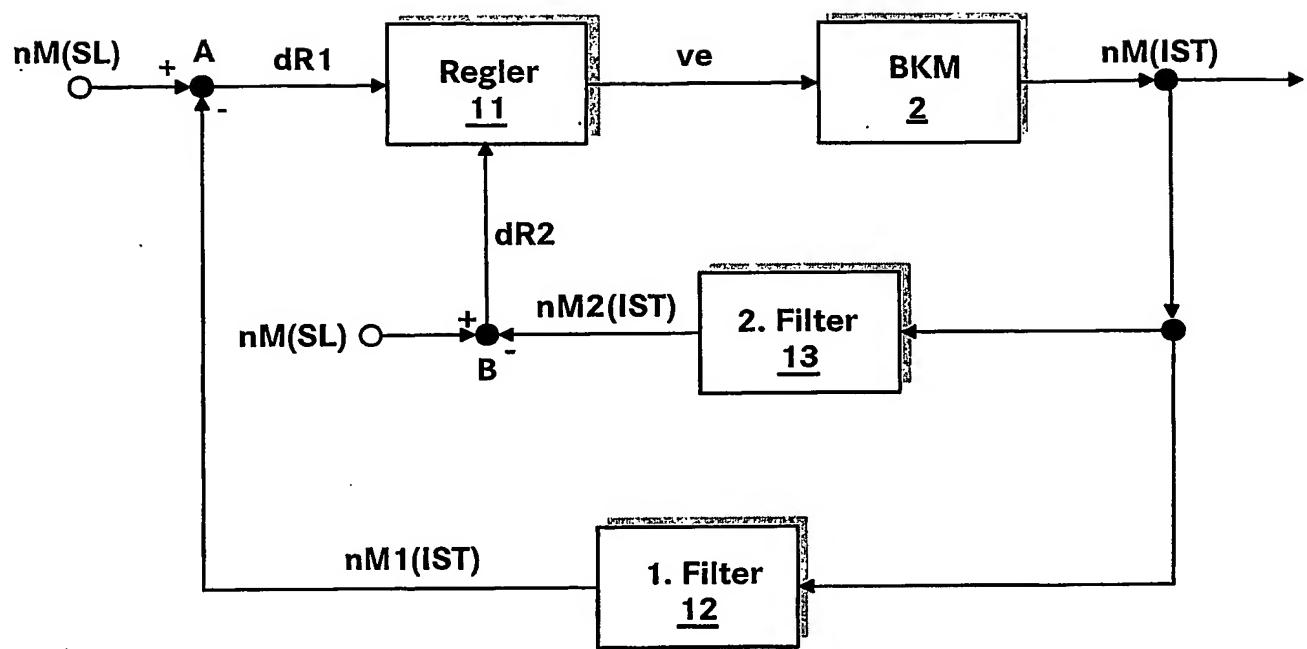


Fig. 2

MTU Friedrichshafen GmbH

15.11.2002

Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine nach dem Oberbegriff von Anspruch 1.

Die Drehzahl einer Antriebseinheit wird typischerweise auf eine Leerlauf- und Enddrehzahl geregelt. Unter Antriebseinheit ist sowohl eine Brennkraftmaschinen-Getriebeeinheit als auch eine Brennkraftmaschinen-Generatoreinheit zu verstehen. Zur Drehzahl-Regelung wird die Drehzahl der Kurbelwelle als Regelgröße erfasst und mit einem Motordrehzahl-Sollwert, der Führungsgröße, verglichen. Die daraus resultierende Regelabweichung wird über einen Drehzahl-Regler in eine Stellgröße für die Brennkraftmaschine, beispielsweise eine Einspritzmenge, gewandelt. Bei einem derartigen Regelkreis besteht ein Problem darin, dass Drehschwingungen, die der Regelgröße überlagert sind, vom Drehzahl-Regler verstärkt werden können. Dies kann zu einer Instabilität des Regelkreises führen.

Dem Problem der Instabilität wird durch ein Drehzahl-Filter im Rückkopplungszweig des Drehzahl-Regelkreises begegnet. Aus der EP 0 059 585 B1 ist ein derartiges Drehzahl-Filter bekannt. Bei diesem werden die Zahnzeiten einer Welle über ein Arbeitsspiel der Brennkraftmaschine erfasst. Unter Arbeitsspiel sind zwei Umdrehungen der Kurbelwelle, entsprechend 720 Grad, zu verstehen. Aus diesen Zahnzeiten wird danach über arithmetische Mittelwertbildung eine gefilterte Zahnzeit berechnet. Aktualisiert wird diese nach jedem Arbeitsspiel.

Diese gefilterte Zahnzeit entspricht dem gefilterten Ist-Drehzahlwert, welcher sodann zur Regelung der Brennkraftmaschine verwendet wird.

5 Ein Drehzahl-Regelkreis zur Regelung einer Antriebseinheit mit einem derartigen Drehzahl-Filter im Rückkopplungszweig ist beispielsweise aus der DE 199 53 767 C2 bekannt.

10 Problematisch bei einem Zwei-Umdrehungs-Filter im Rückkopplungszweig ist jedoch, dass ein stabiles Verhalten der Antriebseinheit mit einer Verschlechterung des Lastannahme-Verhaltens einhergeht.

15 Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde einen Drehzahl-Regelkreis in Bezug auf das Lastannahme-Verhalten zu optimieren.

20 Die Aufgabe wird durch die Merkmale von Anspruch 1 gelöst. Die Ausgestaltungen hierzu sind in den Unteransprüchen dargestellt.

25 Die Erfindung sieht vor, dass aus der Ist-Drehzahl der Brennkraftmaschine mittels eines zweiten Filters eine zweite gefilterte Ist-Drehzahl berechnet wird, aus welcher danach eine zweite Regelabweichung berechnet wird. Bei einer dynamischen Zustandsänderung berechnet der Drehzahl-Regler ein leistungsbestimmendes Signal, beispielsweise eine Einspritzmenge, aus der ersten und der zweiten Regelabweichung. Hierbei wird das leistungsbestimmende Signal bei einer dynamischen Zustandsänderung maßgeblich aus der zweiten Regelabweichung bestimmt.

35 Eine dynamische Zustandsänderung liegt dann vor, wenn eine große Soll-Ist-Abweichung der Drehzahlen vorliegt, beispielsweise bei einer Lastauf- oder Lastabschaltung. Zur schnelleren Erkennung dieses dynamischen Vorgangs ist das zweite Fil-

ter z. B. als Mittelwertfilter mit einem Filterwinkel von 90 Grad ausgeführt. Gegenüber dem Zwei-Umdrehungs-Filter liegt zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt ein gefilterter Drehzahlwert vor, d. h. die dynamische Zustandsänderung wird 5 schneller detektiert.

Die Erfindung bietet als Vorteil, dass Kupplungen mit niedriger Eigenfrequenz verwendet werden können. Da das zweite Filter eine reine Software-Lösung darstellt, kann es in eine bereits bestehende Motorsteuerungs-Software nachträglich integriert werden. 10

Bei einer dynamischen Zustandsänderung ist vorgesehen, dass die zweite Regelabweichung auf einen P-Anteil (proportionalen 15 Anteil) oder einen DT1-Anteil des Drehzahl-Reglers einwirkt. Hierzu sind entsprechende Kennlinien vorgesehen.

In den Zeichnungen sind die bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt. Es zeigen:

20 Fig. 1 ein Systemschaubild;
Fig. 2 einen Drehzahl-Regelkreis;
Fig. 3 ein Blockschaltbild des Drehzahl-Reglers;
Fig. 4 eine Kennlinie;
25 Fig. 5 ein Blockschaltbild des Drehzahl-Reglers (zweite Ausführung);
Fig. 6 eine Kennlinie.

Die Figur 1 zeigt ein Systemschaubild des Gesamtsystems einer Antriebseinheit 1, beispielsweise einer Brennkraftmaschinen-Generatoren-Einheit. Diese bestehend aus einer Brennkraftmaschine 2 mit einer Motorlast 4. Die Brennkraftmaschine 2 treibt über eine Welle mit einem Übertragungsglied 3 die Motorlast 4 an. Bei der dargestellten Brennkraftmaschine 30

2 wird der Kraftstoff über ein Common-Rail-System eingespritzt. Dieses umfasst folgende Komponenten: Pumpen 7 mit Saugdrossel zur Förderung des Kraftstoffs aus einem Kraftstofftank 6, ein Rail 8 zum Speichern des Kraftstoffs und 5 Injektoren 10 zum Einspritzen des Kraftstoffs aus dem Rail 8 in die Brennräume der Brennkraftmaschine 2.

Die Betriebsweise der Brennkraftmaschine 2 wird durch ein elektronisches Steuergerät (EDC) 5 geregelt. Das elektronische Steuergerät 5 beinhaltet die üblichen Bestandteile eines Mikrocomputersystems, beispielsweise einen Mikroprozessor, I/O-Bausteine, Puffer und Speicherbausteine (EEPROM, RAM). In den Speicherbausteinen sind die für den Betrieb der Brennkraftmaschine 2 relevanten Betriebsdaten in Kennfeldern/Kennlinien appliziert. Über diese berechnet das elektronische Steuergerät 5 aus den Eingangsgrößen die Ausgangsgrößen. In Figur 1 sind exemplarisch folgende Eingangsgrößen dargestellt: ein Raildruck pCR, der mittels eines Rail-Drucksensors 9 gemessen wird, ein Ist-Drehzahl-Signal nM(IST) der Brennkraftmaschine 2, eine Eingangsgröße E und ein Signal FP zur Leistungswunsch-Vorgabe durch den Betreiber. Bei einer Fahrzeug-Anwendung entspricht dies der Fahrpedalstellung. Unter der Eingangsgröße E sind beispielsweise 10 der Ladeluftdruck eines Turboladers und die Temperaturen der 15 Kühl-/Schmiermittel und des Kraftstoffs subsumiert. 20 25

In Figur 1 sind als Ausgangsgrößen des elektronischen Steuergeräts 5 ein Signal ADV zur Steuerung der Pumpen 7 mit Saugdrossel und eine Ausgangsgröße A dargestellt. Die Ausgangsgröße A steht stellvertretend für die weiteren Stellsignale zur Steuerung und Regelung der Brennkraftmaschine 2, beispielsweise den Einspritzbeginn SB und ein leistungsbestimmendes Signal ve, entsprechend der Einspritzmenge. 30

In Figur 2 ist ein Blockschaltbild des Drehzahl-Regelkreises dargestellt. Die Eingangsgröße des Drehzahl-Regelkreises ist eine Soll-Drehzahl $nM(SL)$. Die Ausgangsgröße des Drehzahl-Regelkreises ist die ungefilterte Ist-Drehzahl $nM(IST)$. In
5 einem ersten Rückkopplungszweig ist ein erstes Filter 12 zur Berechnung der ersten Ist-Drehzahl $nM1(IST)$ aus der aktuellen ungefilterten Ist-Drehzahl $nM(IST)$ vorgesehen. Das erste Filter 12 ist üblicherweise als ein Zwei-Umdrehungs-Filter ausgeführt, d. h. es mittelt die Ist-Drehzahl $nM(IST)$ über
10 ein Arbeitsspiel entsprechend 720 Grad der Kurbelwelle. In einem zweiten Rückkopplungszweig ist ein zweites Filter 13 zur Berechnung einer zweiten Ist-Drehzahl $nM2(IST)$ aus der aktuellen ungefilterten Ist-Drehzahl $nM(IST)$ vorgesehen. Das zweite Filter 13 ist z. B. als ein Mittelwertfilter mit ei-
15 nem Filterwinkel von 90 Grad Kurbelwellen-Winkel verwirklicht. Das zweite Filter 13 besitzt somit eine wesentlich größere Dynamik als das erste Filter 12.

An einer ersten Vergleichsstelle A wird eine erste Regelabweichung $dR1$ berechnet. Diese bestimmt sich aus der Soll-Drehzahl $nM(SL)$ und der ersten Ist-Drehzahl $nM1(IST)$. Die erste Regelabweichung $dR1$ ist die Eingangsgröße des Drehzahl-Reglers 11. An einer zweiten Vergleichsstelle B wird eine zweite Regelabweichung $dR2$ berechnet. Diese bestimmt sich aus der Soll-Drehzahl $nM(SL)$ und der zweiten Ist-Drehzahl $nM2(IST)$. Die zweite Regelabweichung $dR2$ ist ebenfalls auf den Drehzahl-Regler 11 geführt. Die innere Struktur des Drehzahl-Reglers 11 wird in Verbindung mit der Beschreibung der Figuren 3 bzw. 5 erläutert. Aus den Eingangsgrößen bestimmt der Drehzahl-Regler 11 eine Stellgröße. In Figur 2 ist diese Stellgröße als ein leistungsbestimmendes Signal ve bezeichnet. Das leistungsbestimmende Signal ve stellt die Eingangsgröße dar für die Regelstrecke, hier die Brennkraftmaschine 2. Die Ausgangsgröße der Regelstrecke

entspricht der ungefilterten Ist-Drehzahl $nM(IST)$. Damit ist der Regelkreis geschlossen.

Die Erfindung ist in der Form ausgeführt, dass bei einem
5 stationären Zustand der Antriebseinheit der Drehzahl-Regler
11 das leistungsbestimmende Signal ve ausschließlich in Ab-
hängigkeit der ersten Regelabweichung $dR1$ berechnet. Bei ei-
ner dynamischen Zustandsänderung bestimmt der Drehzahl-
Regler 11 das leistungsbestimmende Signal ve in Abhängigkeit
10 der ersten Regelabweichung $dR1$ und der zweiten Regelabwei-
chung $dR2$.

In Figur 3 ist die innere Struktur des Drehzahl-Reglers 11 in
einer ersten Ausführungsform als Blockschaltbild dargestellt.
15 Der Drehzahl-Regler 11 umfasst hierbei einen P-Anteil 15 zur
Bestimmung eines proportionalen Anteils $ve(P)$ des leistungs-
bestimmenden Signals ve , einen I-Anteil 16 zur Bestimmung ei-
nes integrierenden Anteils $ve(I)$ des leistungsbestimmenden
Signals ve , eine Kennlinie 14 und eine Summation 18. Die ers-
te Regelabweichung $dR1$ stellt die Eingangsgröße für den P-
Anteil 15 und den I-Anteil 16 dar. Die zweite Regelabweichung
20 $dR2$ ist auf die Kennlinie 14 geführt. Die Ausgangsgröße der
Kennlinie 14 entspricht einem Faktor $kp2$, welcher auf den P-
Anteil 15 einwirkt. Eine weitere Eingangsgröße des P-Anteils
ist ein Faktor $kp1$. Die Kennlinie 14 ist in Figur 4 darge-
stellt. Auf der Abszisse sind Werte der zweiten Regelabwei-
chung $dR2$ in positiver/negativer Richtung aufgetragen. Die
Ordinate entspricht dem Faktor $kp2$. Auf der Abszisse sind ein
erster Grenzwert $GW1$ und zweiter Grenzwert $GW2$ eingezeichnet.
25 Bei sehr großen negativen Werten der zweiten Regelabweichung
 $dR2$ wird der Faktor $kp2$ auf einen Wert $GW3$ begrenzt. Eine ne-
gative Regelabweichung liegt dann vor, wenn die zweite Ist-
Drehzahl $nM2(IST)$ größer als die Soll-Drehzahl $nM(SL)$ wird.
Bei positiven zweiten Regelabweichungen $dR2$, welche größer
30 als der zweite Grenzwert $GW2$ sind, wird der Faktor $kp2$ auf
den Wert $GW4$ begrenzt. Im Bereich zwischen dem ersten Grenz-

wert GW1 und dem zweiten Grenzwert GW2 wird der Faktor kp2 auf den Wert Null gesetzt. Aus der Kennlinie 14 wird deutlich, dass bei einem stationären Zustand, d. h. die zweite Regelabweichung dR2 ist nahezu Null, der Faktor kp2 den Wert 5 Null besitzt. Folglich wird der P-Anteil 15 des Drehzahl-Reglers 11 in diesem Fall ausschließlich aus der ersten Regelabweichung dR1 bestimmt. Bei dynamischen Zustandsänderungen, d. h. es liegt eine große negative oder positive zweite Regelabweichung dR2 vor, wirkt der Faktor kp2 auf den P- 10 Anteil 15 des Drehzahl-Reglers 11 ein. Der P-Anteil des leistungsbestimmenden Signals wird nunmehr in Abhängigkeit der ersten Regelabweichung dR1 und den Faktoren kp1 und kp2 berechnet:

$$15 \quad ve(P) = dR1 \cdot (kp1 + kp2)$$

mit

20	ve(P) Proportionaler Anteil des leistungsbestimmenden Signals ve
	dR1 erste Regelabweichung
	kp1 erster Faktor
	kp2 zweiter Faktor

25 Der Faktor kp1 kann hierbei entweder als Konstante vorgegeben werden oder in Abhängigkeit von der ersten Ist-Drehzahl nM1(IST) und/oder dem I-Anteil ve(I) berechnet werden.

30 Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung des P-Anteils ve(P) ergibt sich, wenn die Regelabweichung dR2 direkt zur Berechnung des P-Anteils 15 verwendet wird:

$$ve(P) = dR1 \cdot kp1 + dR2 \cdot kp2$$

35 mit

	ve(P)	Proportionaler Anteil des leistungsbestimmenden Signals ve
	dR1	erste Regelabweichung
	dR2	zweite Regelabweichung
5	kp1	erster Faktor
	kp2	zweiter Faktor

Diese Ausführungsform ist in Figur 3 gestrichelt dargestellt.
Über die Summation 18 werden der P- und I-Anteil summiert.

10 Die Summe entspricht dem leistungsbestimmenden Signal ve.

In Figur 5 ist eine zweite Ausführungsform der inneren Struktur des Drehzahl-Reglers 11 als Blockschaltbild dargestellt. Im Unterschied zur Figur 3 wird bei dieser Ausführungsform die zweite Regelabweichung dR2 auf den P-Anteil 15 und parallel auf einen DT1-Anteil 17 geführt. Über den DT1-Anteil 17 wird der DT1-Anteil $ve(DT1)$ des leistungsbestimmenden Signals ve berechnet. Über die Summation 18 wird so dann das leistungsbestimmende Signal ve aus den Summanden des P-, I- und DT1-Anteils berechnet. Der DT1-Anteil 17 wird mittels einer Kennlinie 19 berechnet. Diese ist in Figur 6 dargestellt. Auf der Abszisse ist hierbei die Zeit t aufgetragen. Die Ordinate entspricht dem DT1-Anteil $ve(DT1)$ des leistungsbestimmenden Signals ve. Über die Kennlinie 19 wird 25 bei einer sprungförmigen Änderung der zweiten Regelabweichung dR2 dieser ein entsprechender Wert $ve(DT1)$ zugewiesen. In das Diagramm sind zwei Grenzwerte GW1 und GW2 eingezeichnet. Der DT1-Anteil wird deaktiviert, wenn die zweite Regelabweichung dR2 kleiner dem ersten Grenzwert GW1 wird, d. h. das Signal $ve(DT1)$ besitzt dann eine Wertigkeit von Null. Der DT1-Anteil wird aktiviert, wenn die zweite Regelabweichung dR2 größer dem zweiten Grenzwert GW2 wird. Über den Grenzwert GW2 wird bewirkt, dass bei dynamischen Zustandsänderungen, also einer großen positiven oder negativen zweiten 30 Regelabweichung dR2, der DT1-Anteil in die Berechnung des leistungsbestimmenden Signals ve miteingeht. Bei stationären Zuständen, d. h. die zweite Regelabweichung dR2 ist nahezu 35

Null, bestimmt sich das leistungsbestimmende Signal v_e ausschließlich aus dem P- und I-Anteil.

5

10

15

20

25

30

35

Bezugszeichen

- 5 1 Antriebseinheit
- 2 Brennkraftmaschine
- 3 Übertragungsglied
- 4 Motorlast
- 5 Elektronisches Steuergerät EDC
- 10 6 Kraftstofftank
- 7 Pumpen
- 8 Rail
- 9 Rail-Drucksensor
- 10 Injektoren
- 15 11 Drehzahl-Regler
- 12 erstes Filter
- 13 zweites Filter
- 14 Kennlinie
- 15 P-Anteil (Proportional-Anteil)
- 20 16 I-Anteil (Integral-Anteil)
- 17 DT1-Anteil
- 18 Summation
- 19 Kennlinie

MTU Friedrichshafen GmbH

15.11.2002

Patentansprüche

5 1. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine (2), bei dem aus einer Ist-Drehzahl ($nM(IST)$) der Brennkraftmaschine (2) mittels eines ersten Filters (12) eine erste gefilterte Ist-Drehzahl ($nM1(IST)$) berechnet wird, aus einer Soll-Drehzahl ($nM(SL)$) der Brennkraftmaschine (2) und der ersten gefilterten Ist-Drehzahl ($nM1(IST)$) eine erste Regelabweichung ($dR1$) berechnet wird und aus der ersten Regelabweichung ($dR1$) mittels eines Drehzahl-Reglers (11) ein leistungsbestimmendes Signal (ve) zur Drehzahl-Regelung der Brennkraftmaschine (2) bestimmt wird,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass aus der Ist-Drehzahl ($nM(IST)$) der Brennkraftmaschine (2) mittels eines zweiten Filters (13) eine zweite gefilterte Ist-Drehzahl ($nM2(IST)$) berechnet wird, aus der Soll-Drehzahl ($nM(SL)$) und der zweiten gefilterten Ist-Drehzahl ($nM2(IST)$) eine zweite Regelabweichung ($dR2$) berechnet wird und bei einer dynamischen Zustandsänderung aus der ersten ($dR1$) und zweiten Regelabweichung ($dR2$) mittels des Drehzahl-Reglers (11) das leistungsbestimmende Signal (ve) zur Drehzahl-Regelung der Brennkraftmaschine (2) berechnet wird.

2. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine (2) nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

- dass die dynamische Zustandsänderung über die zweite Regelabweichung ($dR2$) erkannt wird.

3. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
5 (2) nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der Filterwinkel des zweiten Filters (13) kleiner
als der Filterwinkel des ersten Filters (12) ist.

10 4. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die zweite Regelabweichung ($dR2$) auf einen P-Anteil
(15) des Drehzahl-Reglers (11) einwirkt.

15 5. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 4,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der P-Anteil (15) aus der ersten Regelabweichung
20 ($dR1$), einem ersten Faktor ($kp1$) und einem zweiten Faktor
($kp2$) bestimmt wird, wobei der zweite Faktor ($kp2$) mit-
tels einer Kennlinie (14) aus der zweiten Regelabweichung
($dR2$) berechnet wird.

25 6. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 5,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der P-Anteil zusätzlich aus der zweiten Regelabwei-
chung ($dR2$) berechnet wird.

30 7. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach einem der Ansprüche 5 oder 6,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der erste Faktor ($kp1$) entweder als Konstante vorge-
35 geben wird oder in Abhängigkeit der ersten gefilterten
Drehzahl ($nM1(IST)$) und/oder eines I-Anteils ($ve(I)$) be-
rechnet wird.

8. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 2,

5 durch gekennzeichnet,
dass die zweite Regelabweichung (dR2) auf einen DT1-
Anteil (17) des Drehzahl-Reglers (11) einwirkt.

9. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 8,

10 durch gekennzeichnet,
dass der DT1-Anteil (17) aus der zweiten Regelabweichung
(dR2) über eine Kennlinie (19) bestimmt wird.

10. Verfahren zur Drehzahl-Regelung einer Brennkraftmaschine
(2) nach Anspruch 9,

15 durch gekennzeichnet,
dass mittels der Kennlinie (19) der DT1-Anteil (17) deaktiviert wird, wenn die zweite Regelabweichung (dR2) kleiner einem ersten Grenzwert (GW1) wird ($dR2 < GW1$) und der DT1-Anteil aktiviert wird, wenn die zweite Regelabweichung (dR2) größer einem zweiten Grenzwert (GW2) wird
20 ($dR2 > GW2$).

1 / 4

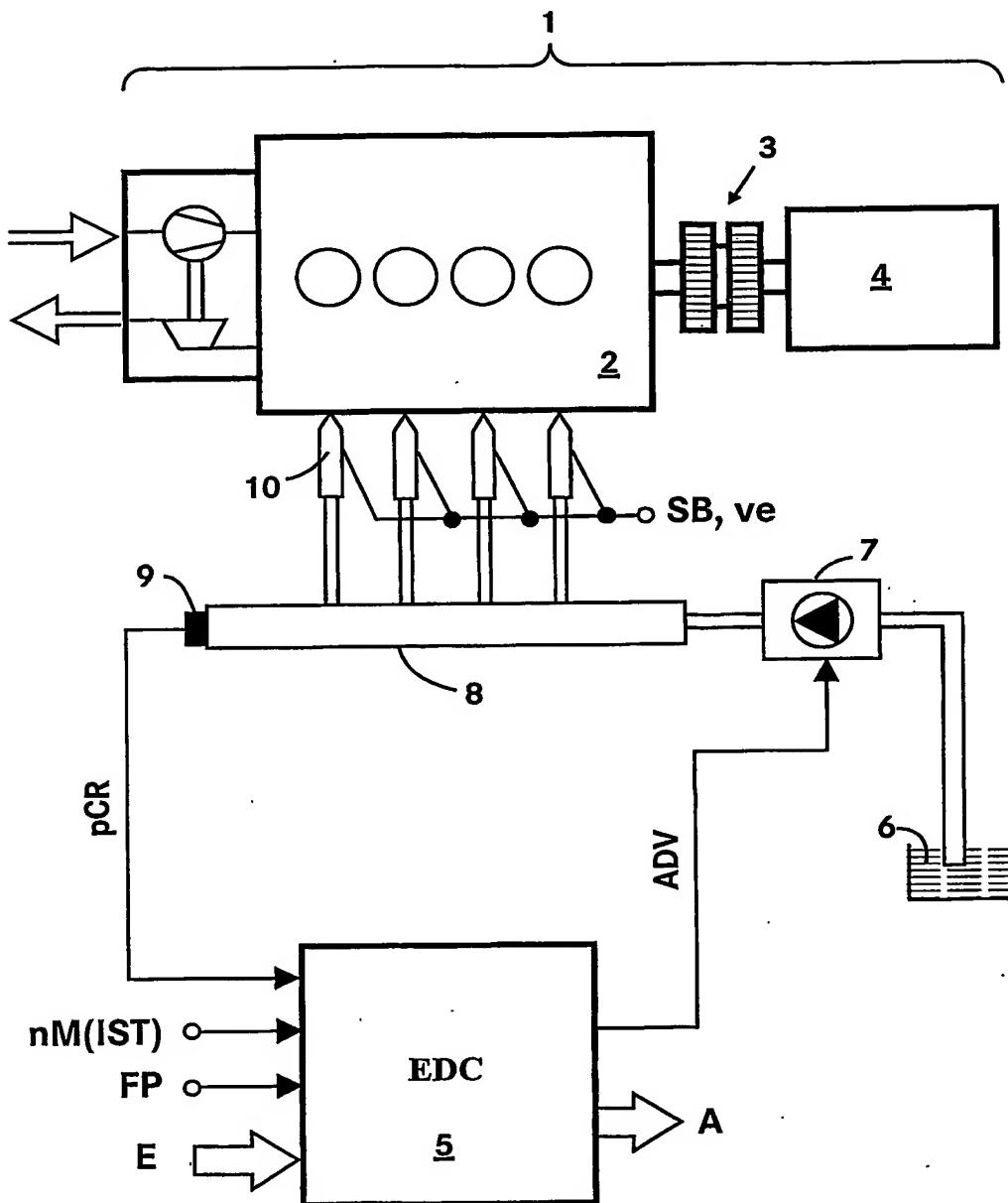


Fig. 1

2 / 4

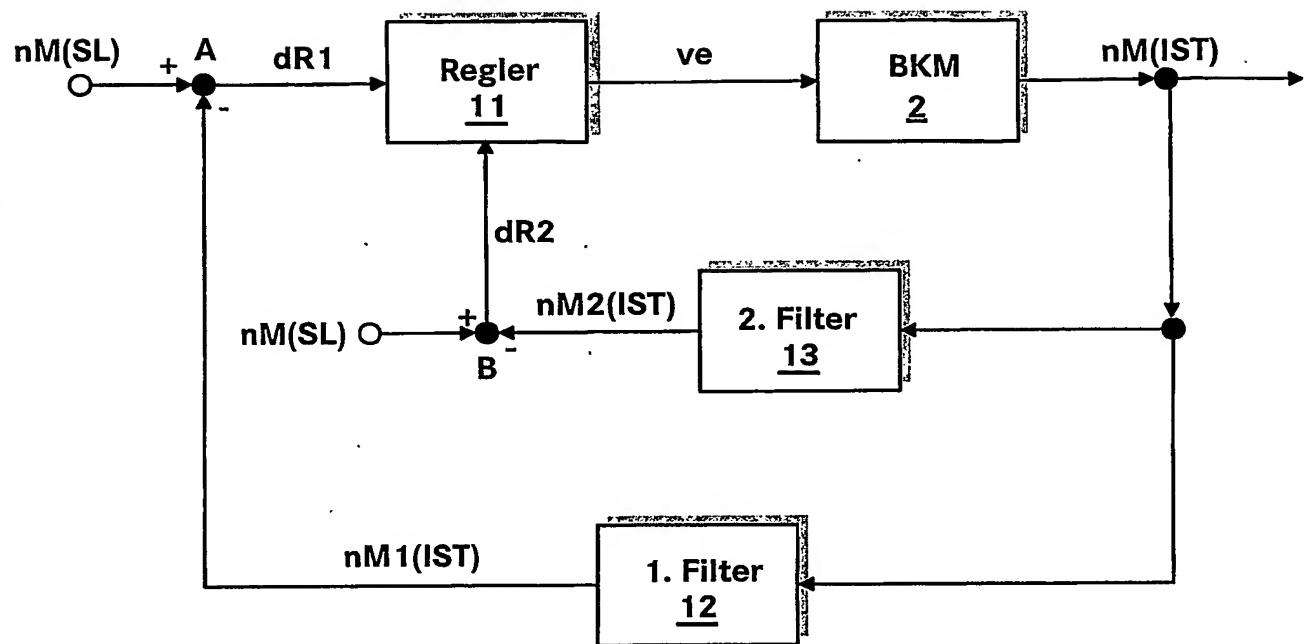


Fig. 2

3 / 4

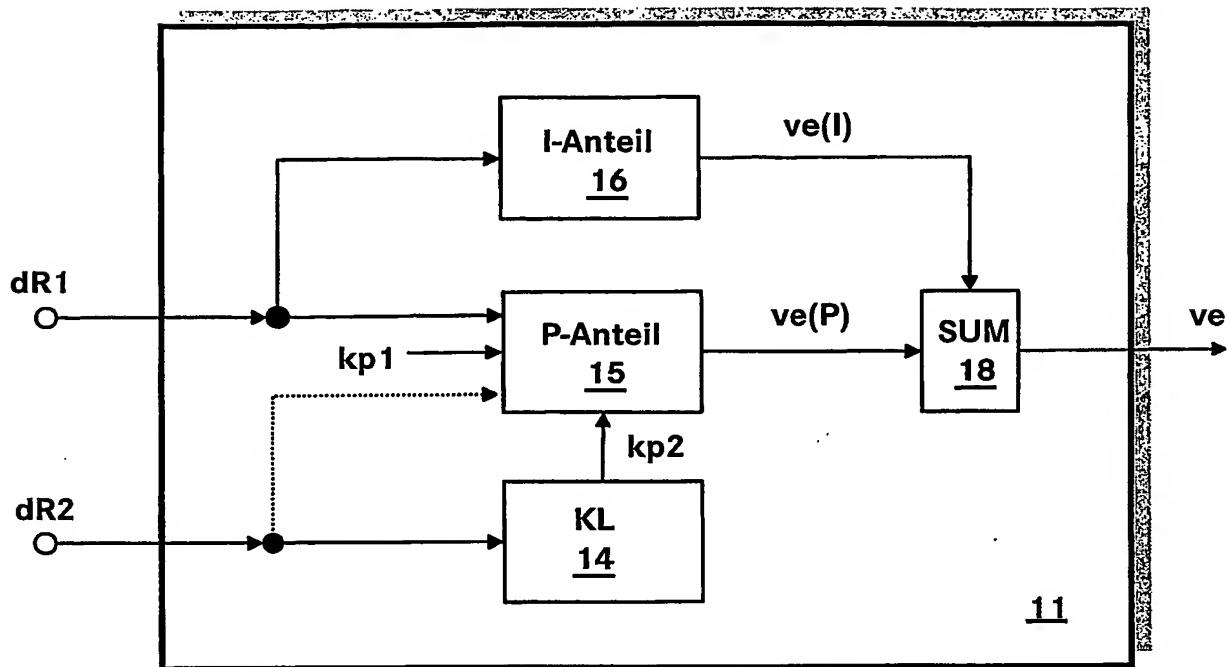


Fig. 3

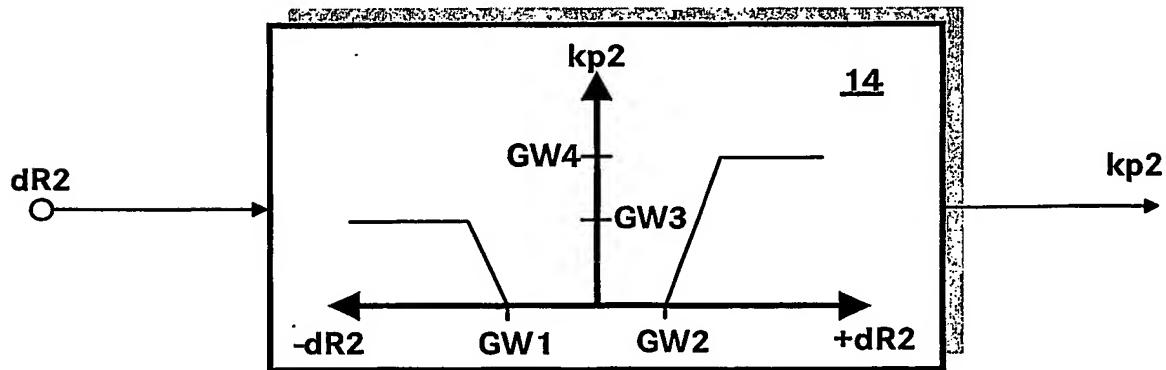


Fig. 4

4 / 4

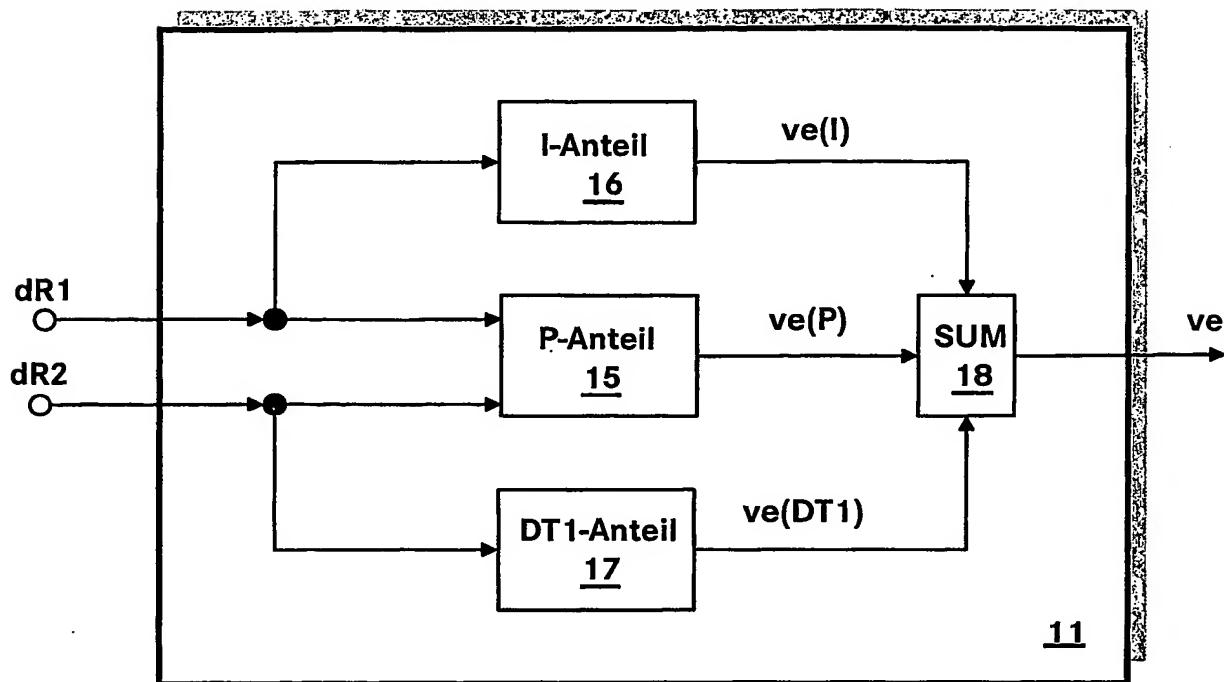


Fig. 5

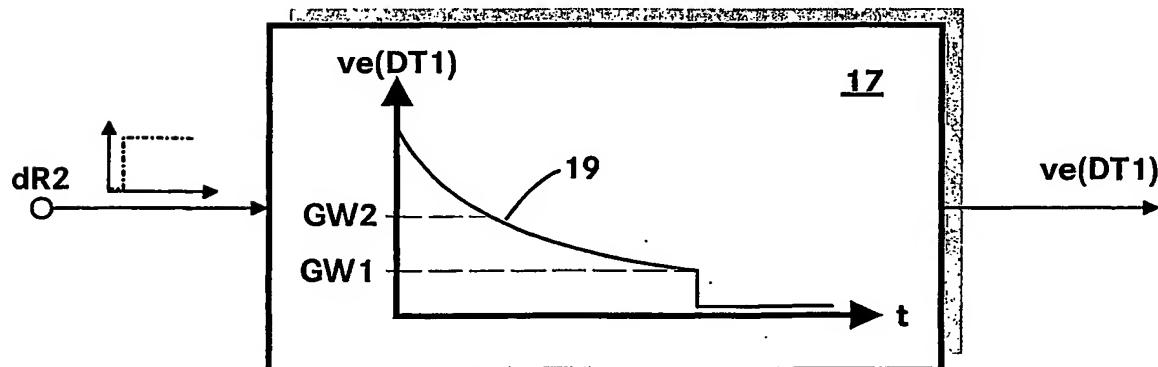


Fig. 6